

BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC ĐIỆN LỰC



ĐẠI HỌC ĐIỆN LỰC
ELECTRIC POWER UNIVERSITY

ĐINH VĂN THÌN

**NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG MÔ HÌNH THIẾT KẾ
CÁNH TUABIN VÀ CẤU HÌNH TRANG TRẠI
ĐIỆN GIÓ TẠI VIỆT NAM**

Ngành: Kỹ thuật năng lượng

Mã số: Thí điểm

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT NĂNG LƯỢNG

Hà Nội – Năm 2026

BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC ĐIỆN LỰC

ĐINH VĂN THÌN

**NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG MÔ HÌNH THIẾT KẾ
CÁNH TUABIN VÀ CẤU HÌNH TRANG TRẠI
ĐIỆN GIÓ TẠI VIỆT NAM**

Ngành: Kỹ thuật năng lượng

Mã số: Thí điểm

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS. TS. Nguyễn Hữu Đức
2. TS. Lê Quang Sáng

Hà Nội – Năm 2026

MỤC LỤC

BỐ CỤC LUẬN ÁN	1
GIỚI THIỆU	2
Lý do nghiên cứu:.....	2
Mục tiêu nghiên cứu:.....	4
CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	5
Cơ sở lý thuyết:	5
Phương pháp nghiên cứu:.....	5
KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU.....	8
Mô hình mô phỏng sự thay đổi tốc độ gió theo địa hình và độ cao:	8
Mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin:	10
Mô hình thiết kế cấu hình lắp đặt các tuabin trong trang trại điện gió:.....	20
KẾT LUẬN	26
Một số đóng góp mới về khoa học và thực tiễn:	27
Các hướng nghiên cứu tiếp theo:.....	28
DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC	29

BỐ CỤC LUẬN ÁN

Luận án này nghiên cứu xây dựng các mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin điện gió và cấu hình lắp đặt các tuabin trong các trang trại điện gió trên đất liền tại Việt Nam.

Các nội dung chính của luận án này được chia thành 04 chương, bao gồm: Chương I là Giới thiệu và Tổng quan; Chương II là Phương pháp luận; Chương III là Mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin; Chương IV là Mô hình thiết kế cấu hình lắp đặt tuabin trong các trang trại điện gió trên đất liền.

Luận án này sử dụng 70 ký hiệu và thuật ngữ viết tắt; 08 bảng và 69 hình ảnh để mô tả các nội dung lý thuyết, mô hình và kết quả thu được. Toàn bộ các phần của luận án được trình bày trong 136 trang.

GIỚI THIỆU

Lý do nghiên cứu:

Hiện nay, quá trình biến đổi khí hậu đang diễn ra với tốc độ nhanh hơn và phạm vi ảnh hưởng đã lan rộng trên phạm vi toàn cầu. Hậu quả của biến đổi khí hậu ngày càng nghiêm trọng, đặc biệt là vấn đề nhiệt độ tăng và ô nhiễm không khí. Theo báo cáo của WMO [1], nhiệt độ không khí trung bình toàn cầu vào năm 2024 đã tăng 1,55 °C so với giai đoạn 1850 - 1900. Nguyên nhân chính gây ra hiện tượng nóng lên toàn cầu là do nồng độ các khí nhà kính như CO₂, CH₄ và N₂O trong không khí quá cao. Các chất này chủ yếu được tạo ra từ quá trình đốt nhiên liệu hóa thạch như than, xăng, dầu để sản xuất điện và phục vụ giao thông vận tải của con người. Quốc gia càng phát triển thì nhu cầu về điện và nhiên liệu giao thông vận tải càng lớn. Không một quốc gia nào đứng ngoài cuộc trong việc phòng chống biến đổi khí hậu.

Tại COP 26, Thủ tướng Phạm Minh Chính đã cam kết Việt Nam sẽ xây dựng và triển khai các biện pháp mạnh mẽ nhằm giảm phát thải khí nhà kính, hướng tới mục tiêu phát thải ròng bằng 0 vào năm 2050. Việt Nam đã có nhiều hành động cụ thể để thực hiện cam kết này.

Thông qua các tuyên bố và Quy hoạch Phát triển Điện lực Quốc gia VIII điều chỉnh, Việt Nam sẽ phát triển tối đa điện từ năng lượng tái tạo, tiếp tục tăng tỷ trọng năng lượng tái tạo trong cơ cấu nguồn điện. Cụ thể, thúc đẩy phát triển điện gió trên đất liền, gần bờ và ngoài khơi phù hợp với khả năng hấp thụ của hệ thống lưới điện, chi phí truyền tải hợp lý gắn với đảm bảo an toàn vận hành và kinh tế, tận dụng tối đa cơ sở hạ tầng lưới điện hiện có. Tổng công suất điện

gió trên đất liền và gần bờ đạt khoảng 26.066 MW - 38.029 MW vào năm 2030, khoảng 84.696 MW - 91.400 MW vào năm 2050. Tổng công suất điện gió ngoài khơi cho phát điện đạt khoảng 6.000 MW - 17.032 MW trong giai đoạn 2030 - 2035 và khoảng 113.503 MW - 139.097 MW vào năm 2050. Công suất điện gió ngoài khơi cho sản xuất năng lượng mới đạt khoảng 15.000 MW vào năm 2035 và khoảng 240.000 MW vào năm 2050 [4]. Theo báo cáo của EVN ngày 30 tháng 4 năm 2025 [5], tổng công suất các nhà máy điện gió trên đất liền và gần bờ đã có COD là 1.214,5 MW và chưa có nhà máy điện gió ngoài khơi nào được triển khai. Rõ ràng, Chính phủ Việt Nam cần có những hành động mạnh mẽ và thiết thực hơn nữa để đạt được các cam kết và mục tiêu trong Quy hoạch Phát triển Điện lực Quốc gia VIII điều chỉnh.

Theo quan điểm của Chính phủ được nêu trong Quy hoạch Phát triển Điện lực Quốc gia VIII điều chỉnh, việc quy hoạch phát triển các dự án nguồn điện phải có tầm nhìn dài hạn, hiệu quả và bền vững. Phát triển điện lực phải dựa trên nguyên tắc tối ưu hóa các yếu tố tổng thể về nguồn điện, truyền tải và phân phối gắn với đảm bảo an ninh năng lượng và bảo vệ môi trường. Tuy nhiên, các dự án điện gió đã triển khai trên thực tế còn nhiều bất cập, như chưa có quy hoạch tổng thể cấp quốc gia; chưa làm chủ được công nghệ khảo sát, thiết kế, chế tạo, lắp đặt, vận hành, bảo dưỡng, xử lý tuabin gió; hoàn toàn phụ thuộc vào các công ty tư vấn, đầu tư, cung cấp thiết bị nước ngoài. Hệ quả là, nhiều nhà máy mới đã xảy ra sự cố, tai nạn như gãy cánh tuabin, cháy nổ máy phát điện, vận hành dưới công suất thiết kế, vv... hoặc một số nhà máy điện gió đã chuyển nhượng quyền sở hữu cho các Tập đoàn nước ngoài sau khi ký thành công hợp đồng mua bán điện (PPA).

Điều này dẫn đến hiệu quả đầu tư thấp, gây mất an ninh năng lượng và làm giảm niềm tin của người dân vào các dự án điện gió nói chung.

Xuất phát từ những vấn đề thực tiễn và mong muốn làm chủ công nghệ, luận án đã được thực hiện với tiêu đề "Nghiên cứu xây dựng mô hình thiết kế cánh tuabin và cấu hình trang trại điện gió tại Việt Nam". Đề tài nghiên cứu này là một công trình khoa học có thể sử dụng làm nguồn tham khảo tin cậy, giúp các nhà quản lý và nhà đầu tư đưa ra quyết định chính xác hơn trong các giai đoạn khảo sát, quy hoạch, lựa chọn địa điểm dự án, thiết kế, lựa chọn tuabin và cấu hình lắp đặt tuabin tại các trang trại điện gió trên đất liền, phù hợp với đặc điểm địa hình, cơ sở hạ tầng và tài nguyên gió.

Mục tiêu nghiên cứu:

Mục tiêu của nghiên cứu này là xây dựng các mô hình thiết kế cánh tuabin công suất nhỏ (dưới 100kW) và cấu hình lắp đặt cho các trang trại gió tại Việt Nam. Các mô hình được sử dụng để xác định khu vực phát triển, thiết kế cánh tuabin và cấu hình lắp đặt tại các trang trại gió trên đất liền. Qua đó, góp phần nâng cao hiệu suất vận hành của các trang trại bằng cách tối đa giá trị Sản lượng điện hàng năm (AEP) và đảm bảo Chi phí năng lượng bình quân (LCOE) phù hợp với giá mua điện hiện hành tại Việt Nam.

Phạm vi nghiên cứu của luận án là công nghệ phát điện gió sử dụng tuabin trục ngang ba cánh. Đối tượng nghiên cứu của luận án là biên dạng cánh tuabin trục ngang công suất nhỏ ($<100\text{kW}$) và cấu hình lắp đặt của các tuabin trong các trang trại gió trên đất liền tại Việt Nam.

CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Cơ sở lý thuyết:

Luận án này sử dụng một số lý thuyết và mô hình mô phỏng, bao gồm:

- Mô hình GIS và CFD để nghiên cứu, đánh giá và lựa chọn các khu vực tiềm năng cho trang trại gió trên đất liền. Kết quả từ mô hình mô phỏng này sẽ xác định các đặc điểm địa hình và tài nguyên gió như độ cao và độ nhám của địa hình, tốc độ gió trung bình và cường độ chảy rối làm thông số đầu vào cho mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin và cấu hình lắp đặt tuabin trong các trang trại điện gió.

- Lý thuyết BEM và BOM kết hợp với mô hình mô phỏng PM, LLFVWM và CFD để nghiên cứu biên dạng cánh và thông số vận hành của tuabin gió theo đặc điểm tài nguyên gió với mục tiêu đạt được hệ số công suất lớn nhất.

- Lý thuyết BEM và Jensen kết hợp với mô hình GIS và CFD để nghiên cứu thiết kế cấu hình lắp đặt tuabin tại các khu vực trang trại gió với mục tiêu đạt được giá trị AEP lớn nhất và giá trị LCOE hợp lý.

Phương pháp nghiên cứu:

Để thực hiện các nội dung nghiên cứu trong luận án, một số phương pháp nghiên cứu đã được sử dụng, bao gồm:

- Phương pháp tìm kiếm, thu thập và xử lý thông tin, dữ liệu trực tuyến: Phương pháp này được sử dụng để giải quyết các vấn đề liên quan đến nguồn dữ liệu như đặc điểm địa hình, cơ sở hạ tầng, tài nguyên gió, thông số thiết kế tuabin; cơ sở lý thuyết BEM, BOM,

AEP, WL và LCOE; cơ sở lý thuyết và thư viện dữ liệu của các mô hình GIS, CFD, PM và LLFVWM.

- Phương pháp mô phỏng vật lý: Sử dụng các lý thuyết vật lý khác nhau để mô tả, phân tích và diễn giải các quá trình chuyển động và tương tác của các dòng khí trong các điều kiện cụ thể khác nhau. Các phương trình bảo toàn vật lý là nền tảng cơ bản cho các mô hình phân tích, mô phỏng số như mô hình GIS và CFD. Các đặc điểm địa hình, cơ sở hạ tầng, tài nguyên gió tại khu vực quan tâm sẽ được xây dựng và hiển thị trên bản đồ số dựa trên BlenderGIS, QGIS hoặc Ansys CFX, Fluent. Sau đó, tạo ra các mô hình 2D, 3D của các đối tượng. Các mô hình này sẽ được sử dụng để mô phỏng các quá trình tương tác của gió trong các điều kiện khác nhau. Từ đó, các quá trình tương tác, hiệu ứng dòng xoáy, tổn thất năng lượng khi gió thổi qua khu vực này sẽ được xác định. Kết quả này được sử dụng để tính toán các thông số vận hành của các tuabin, từ đó đánh giá và lựa chọn vị trí lắp đặt tuabin phù hợp tại các khu vực khảo sát.

- Phương pháp thống kê: Phương pháp này dựa trên dữ liệu lịch sử lớn để đưa ra dự báo. Phương pháp này được thực hiện theo phân tích chuỗi thời gian để xây dựng các hàm phân bố tần suất gió theo khu vực hoặc các hàm phân bố tốc độ gió theo độ cao địa hình tại các vị trí khác nhau. Các hàm này sẽ cung cấp dữ liệu đầu vào quan trọng cho các tính toán thiết kế và mô hình mô phỏng CFD.

- Phương pháp phân tích:

+ Sử dụng lý thuyết BEM, BOM kết hợp với các mô hình PM, LLFVWM, CFD để nghiên cứu và thiết kế biên dạng cánh tuabin gió

theo đặc điểm địa hình và tài nguyên gió tại các khu vực khảo sát. Từ đó, phân tích xác định được thiết kế tuabin phù hợp nhất.

+ Sử dụng lý thuyết BEM, Jensen kết hợp với mô hình GIS, CFD để nghiên cứu các cấu hình lắp đặt tuabin tối ưu tại các khu vực phát triển trang trại gió nhằm đạt được AEP lớn nhất và LCOE hợp lý. Cuối cùng, phân tích xác định được cấu hình lắp đặt tuabin phù hợp nhất cho toàn bộ khu vực phát triển trang trại gió.

Luận án này kết hợp các phương pháp trên để thu thập các giá trị và kết quả theo đối tượng nghiên cứu. Sau đó, các kết quả này sẽ được phân tích, đánh giá và so sánh với các giá trị thực nghiệm và thực tế trong một số trường hợp cụ thể.

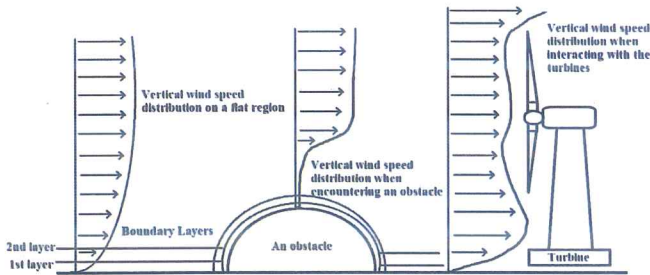
KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

Mô hình mô phỏng sự thay đổi tốc độ gió theo địa hình và độ cao:

Việt Nam có lãnh thổ trải dài từ Bắc xuống Nam, địa hình chủ yếu là đồi núi. Độ cao địa hình tăng dần từ Đông sang Tây. Hướng gió thay đổi theo mùa và theo vùng, chủ yếu theo hướng Tây Nam và Đông Nam, đôi khi theo hướng Đông Bắc.

Khi luồng không khí di chuyển, đặc điểm của tài nguyên gió sẽ phụ thuộc rất lớn vào địa hình. Do không khí là một loại chất lưu, nên tính chất và hình dạng của chất lưu thường phụ thuộc vào môi trường xung quanh. Dòng không khí chuyển động sẽ liên tục thay đổi trạng thái với ba dạng: dòng chảy tầng, dòng chảy chuyển tiếp và dòng chảy rối. Ở mỗi trạng thái, các tính chất quan trọng như hướng, dòng chảy, mật độ, độ nhớt, vv... sẽ thay đổi tương ứng. Do đó, cùng một nguồn tài nguyên gió ban đầu, nhưng khi di chuyển đến các vùng địa hình khác nhau, hầu như tất cả các tính chất của chúng sẽ bị thay đổi. Vì vậy, cần có những nghiên cứu chi tiết và cụ thể cho từng khu vực theo đặc điểm địa hình và tài nguyên gió để đảm bảo tất cả các quá trình xảy ra đều được tính toán trước và đảm bảo các tuabin sẽ khai thác hiệu quả năng lượng cao nhất trong suốt vòng đời vận hành của các trang trại điện gió. Để mô tả chính xác các quá trình dòng khí, cần làm rõ một số thông số ban đầu quan trọng như: Hướng, tốc độ và cường độ chảy rối của dòng khí đi vào khu vực trang trại; Lớp bề mặt đất xung quanh, tiếp xúc trực tiếp với dòng khí, thường được gọi là Lớp Biên. Tại bề mặt tiếp xúc với Lớp Biên, tốc độ dòng khí sẽ bằng 0. Độ nhám của Lớp Biên sẽ ảnh hưởng lớn đến sự hình thành ma sát với lớp khí tiếp xúc trực tiếp, từ đó tạo ra các vùng nhiễu loạn, vùng xoáy và dòng khí ngược hướng như minh họa trong Hình 3.1. Điều

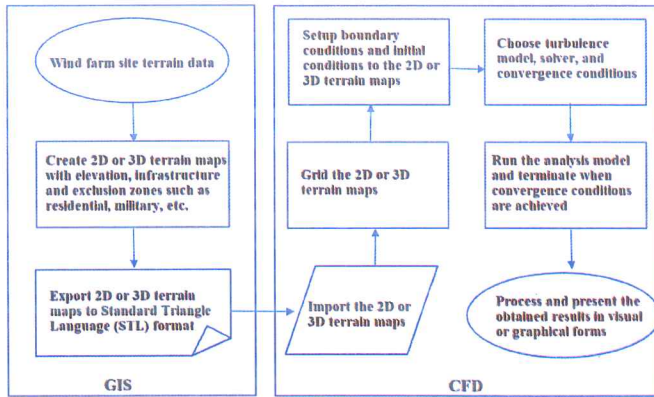
này dẫn đến mất năng lượng dòng khí và các vấn đề khác như rung động (vấn đề mỏi), tiếng ồn (vấn đề sức khỏe) cho các tuabin trong quá trình vận hành. Cần xác định rõ độ rộng của vùng tương tác này để tránh những tác động và tổn thất không đáng có đến hoạt động thực tế của tuabin.



Hình 3.1. Minh họa quá trình tương tác của gió khi có vật cản

Lãnh thổ Việt Nam chủ yếu là đồi núi, chênh lệch độ cao lớn. Do đó, cần tiến hành nghiên cứu cho từng khu vực dự kiến xây dựng trang trại để xác định phân bố tốc độ gió chính xác nhất. Lưu đồ phân tích đặc điểm địa hình và nguồn gió trong khu vực tương ứng với một trang trại gió được thể hiện ở Hình 3.2.

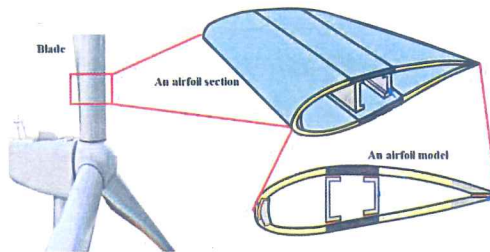
Mô hình GIS – CFD được đề xuất trong nghiên cứu này có thể giúp lựa chọn các khu vực và vị trí tối ưu nhất để phát triển các dự án điện gió trên đất liền tại Việt Nam. Kết quả thu được từ mô hình này bao gồm vị trí và đặc điểm địa hình của các trang trại, phân bố tốc độ gió theo địa hình và độ cao, đây là cơ sở quan trọng cho việc tiến hành các nghiên cứu tiếp theo về thiết kế biên dạng cánh và cấu hình lắp đặt tuabin tại các khu vực trang trại.



Hình 3.2. Lưu đồ phân tích đặc điểm địa hình và nguồn gió

Mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin:

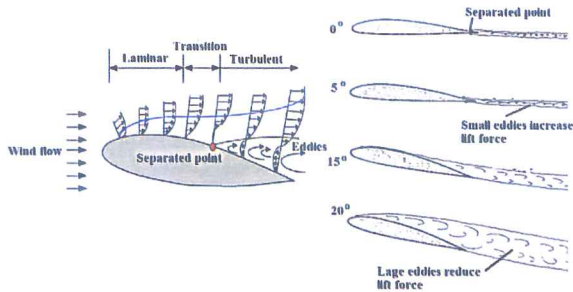
Mô hình GIS – CFD cho phép xác định đặc điểm địa hình và tài nguyên gió tại từng vị trí trong khu vực phát triển trang trại gió. Hàm phân bố tốc độ gió và cường độ chảy rối theo độ cao là những cơ sở quan trọng để lựa chọn hoặc thiết kế tuabin gió phù hợp.



Hình 3.13. Minh họa thiết kế của cánh tuabin gió trục ngang.

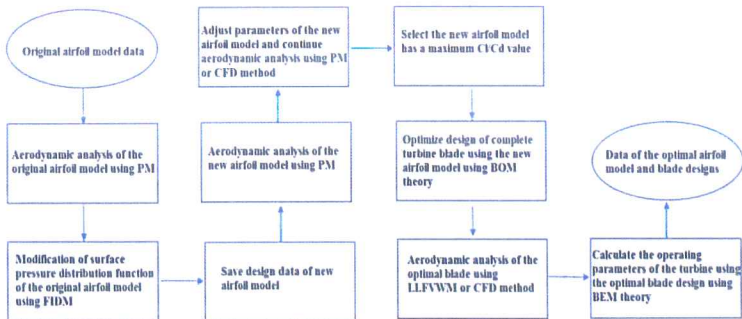
Cánh tuabin gió thường được thiết kế từ nhiều phần mẫu cánh khác nhau. Các phần mẫu cánh sẽ được đặt ở các vị trí, độ dày, chiều dài và góc xoắn khác nhau để tạo nên một thiết kế cánh hoàn chỉnh. Khi gió đến tương tác với bề mặt của cánh, tùy thuộc vào tốc độ gió, AoA, kích thước và độ nhám bề mặt của cánh, các hiện tượng khác nhau sẽ xảy ra như minh họa trong Hình 3.14.

Nếu các mô hình cánh được thiết kế về kích thước và giá trị AoA phù hợp với tốc độ gió thổi vào, nó sẽ tạo ra lực nâng lớn nhất và lực cản nhỏ nhất, khi đó tỷ lệ C_l/C_d sẽ đạt giá trị lớn nhất. Ngược lại, nếu kích thước cánh hoặc giá trị AoA không phù hợp với đặc điểm của gió thổi vào, nó sẽ tạo ra lực cản lớn và làm giảm lực nâng, dẫn đến giá trị C_l/C_d thấp.



Hình 3.14. Minh họa các quá trình tương tác của gió với cánh

Khi gió đến tương tác với cánh tuabin dưới giá trị AoA, mỗi phần cánh sẽ đón gió ở một góc khác nhau. Hệ số công suất của toàn bộ cánh sẽ phụ thuộc vào giá trị C_l/C_d của từng phần cánh. Do đó, để thiết kế một cánh hoàn chỉnh, cần phải nghiên cứu thiết kế các mô hình mẫu cánh. Sau đó, các mẫu cánh cho hiệu quả khai thác năng lượng gió cao nhất sẽ được kết hợp để tạo ra biên dạng cánh tối ưu dựa trên lý thuyết BOM. Biên dạng cánh tối ưu là cánh cho giá trị hệ số công suất lớn nhất. Mô hình chi tiết để thiết kế biên dạng cánh tuabin được đề xuất được thể hiện trong Hình 3.15.



Hình 3.15. Lưu đồ thiết kế biên dạng cánh tuabin

Mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin tối ưu bao gồm 11 bước như sau:

- Bước 1: Lựa chọn mô hình mẫu cánh có hiệu suất khai thác năng lượng gió cao - Mô hình mẫu cánh nguyên bản.

- Bước 2: Phân tích các thông số khí động học của mô hình cánh nguyên bản trong vùng tốc độ gió quan tâm bằng PM. Kết quả là C_l , C_d , C_l/C_d khi hoạt động trong điều kiện tốc độ gió và đồ thị hoặc hàm phân bố tốc độ gió hoặc áp suất gió trên bề mặt mô hình mẫu cánh nguyên bản.

- Bước 3: Hiệu chỉnh đồ thị hoặc hàm phân bố tốc độ gió hoặc hàm phân bố áp suất gió trên bề mặt mô hình mẫu cánh ban đầu để thu được đồ thị hoặc hàm phân bố áp suất mới có chênh lệch lớn nhất giữa bề mặt trên và dưới của mô hình cánh ban đầu. Kết quả là thu được hàm phân bố tốc độ gió hoặc hàm phân bố áp suất mới. Sau đó, một mẫu cánh mới sẽ được tạo ra dựa trên hàm phân bố tốc độ gió hoặc hàm phân bố áp suất gió mới bằng cách sử dụng FIDM.

- Bước 4: Lưu dữ liệu mẫu cánh mới với tên hoặc số nhận dạng phù hợp.

- Bước 5: Phân tích các thông số khí động học của mô hình mẫu cánh mới trong cùng điều kiện tốc độ gió bằng PM. Kết quả là thu được C_l , C_d , C_l/C_d . So sánh và đánh giá các giá trị thu được từ mô hình mẫu cánh mới với mô hình ban đầu.

- Bước 6: Liên tục điều chỉnh các thông số thiết kế của mô hình mẫu cánh mới như MT, MTP, MC và MCP để thu được các mô hình mẫu cánh mới. Sau đó, tất cả các mô hình mẫu cánh mới được phân tích khí động học bằng phương pháp PM hoặc CFD. Kết quả thu được là C_l , C_d , C_l/C_d của các mô hình mẫu cánh mới trong cùng điều kiện tốc độ gió.

- Bước 7: So sánh và đánh giá C_l/C_d của mô hình mẫu cánh ban đầu và các mô hình mẫu cánh mới, sau đó chọn mô hình cánh có C_l/C_d lớn nhất. Kết quả là thu được biên dạng mô hình mẫu cánh tối ưu trong vùng tốc độ gió quan tâm.

- Bước 8: Sử dụng lý thuyết BOM để sắp xếp các mô hình mẫu cánh theo các thông số kích thước và góc xoắn khác nhau để tạo ra các thiết kế cánh tuabin hoàn chỉnh. Mỗi thiết kế cánh hoàn chỉnh có thể sử dụng nhiều loại mẫu cánh khác nhau, nhưng cũng có thể chỉ sử dụng mô hình mẫu cánh có C_l/C_d lớn nhất. Kết quả là các biên dạng cánh tuabin.

- Bước 9: Các biên dạng cánh tuabin mới này được phân tích khí động học bằng phương pháp LLFVWM hoặc CFD để tính toán

giá trị hệ số công suất C_p ở các tốc độ gió khác nhau. Thiết kế biên dạng cánh tuabin có giá trị C_p lớn nhất được chọn.

- Bước 10: Biên dạng cánh có C_p lớn nhất được sử dụng để tạo ra tuabin trục ngang 3 cánh. Sau đó, lý thuyết BEM được sử dụng để xác định các thông số vận hành của tuabin như công suất điện đầu ra dựa trên các thông số của hệ thống cơ khí và máy phát điện. Kết quả là các giá trị vận hành của các thiết kế tuabin trong các điều kiện khác nhau.

- Bước 11: So sánh các giá trị hệ số công suất của các thiết kế tuabin và chọn thiết kế cánh có giá trị C_p lớn nhất. Kết quả là một thiết kế cánh tuabin tối ưu trong vùng tốc độ gió quan tâm. Cuối cùng, dữ liệu chi tiết của thiết kế cánh tuabin tối ưu được xuất ra và đặt tên phù hợp.

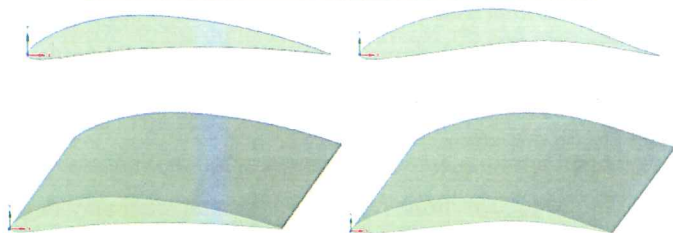
Mô hình thiết kế tối ưu của biên dạng cánh quạt tuabin như thể hiện trong Hình 3.15 sau đó được triển khai trong luận án này. Theo bước đầu tiên của mô hình thiết kế, ba mô hình mẫu cánh ban đầu có hiệu suất khai thác năng lượng gió tốt và thường được sử dụng trong lĩnh vực điện gió được lựa chọn gồm: NACA6409, S1010, S1223. Các thiết kế mẫu cánh này đại diện cho các mô hình cánh đối xứng và không đối xứng.

Từ bước 2 đến bước 7, các mô hình mẫu cánh này được phân tích bằng phương pháp PM hoặc CFD để xác định các đại lượng khí động học đặc trưng trong điều kiện vận hành với tốc độ gió trong khoảng 3,0 - 10,0 m/s. Kích thước của các mô hình mẫu cánh được đưa về chiều dài tiêu chuẩn $c=1,0$ m và được chia đều thành 149 tấm khi sử dụng PM. Tuy nhiên, do tốc độ gió phổ biến ở Việt Nam nằm

trong khoảng 4,0 - 6,0 m/s. Do đó, kết quả phân tích với tốc độ gió này sẽ được trình bày cụ thể trong luận án. Cả 03 mô hình mẫu cánh ban đầu đều được phân tích theo cùng cách thức như trong Hình 18 và sau khi so sánh, lựa chọn, 03 mô hình mẫu cánh mới đã được thiết kế cho C_l/C_d lớn nhất tương ứng. Các mô hình mẫu cánh mới được đặt tên dựa trên hợp tác nghiên cứu giữa Trường Đại học Điện lực và Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam: VAST-EPU-N6409, VAST-EPU-S1010, VAST-EPU-S1223.

Bảng 3.2. Thông số thiết kế của NACA6409 và VAST-EPU-N6409

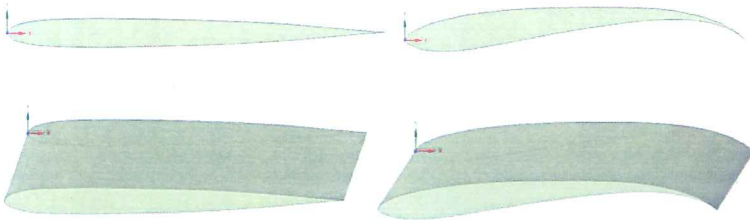
Thông số	NACA6409	VAST-EPU-N6409
MT	9.00%	10.30%
MTP	30.03%	32.03%
MC	6.0%	7.99%
MCP	40.44%	51.45%



Hình 3.20. Biên dạng mẫu cánh NACA6409 và VAST-EPU-N6409

Bảng 3.3. Thông số thiết kế của mẫu S1010 và VAST-EPU-S1010

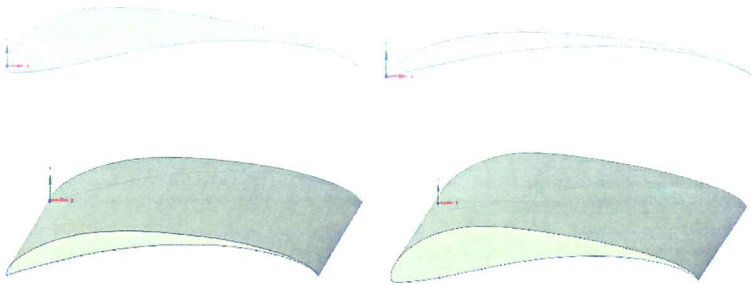
Thông số	S1010	VAST-EPU-S1010
MT	6.02%	8.00%
MTP	23.42%	20.32%
MC	0.00%	5.96%
MCP	0.00%	72.77%



Hình 3.24. Biên dạng mẫu cánh S1010 và VAST-EPU-S1010

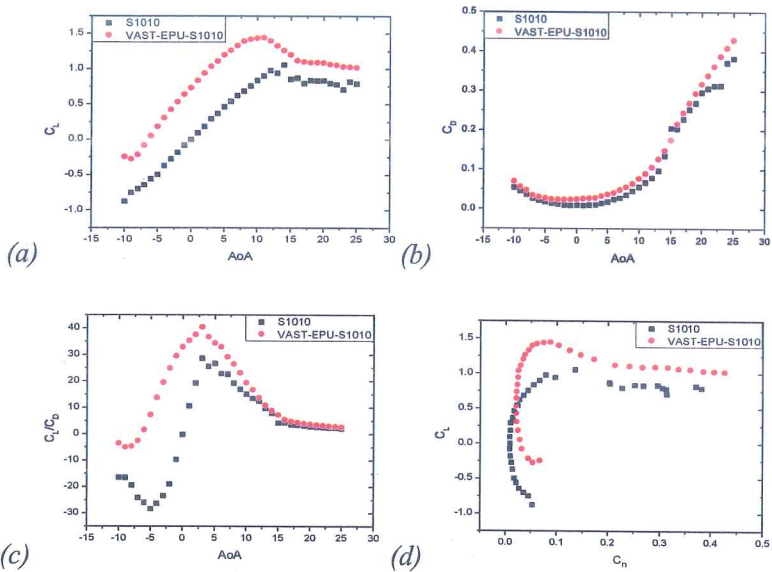
Bảng 3.4. Thông số thiết kế của mẫu S1223 và VAST-EPU-S1223

Thông số	S1223	VAST-EPU-S1223
MT	12.14%	5.0%
MTP	20.12%	19.82%
MC	8.68%	8.16%
MCP	47.45%	48.65%



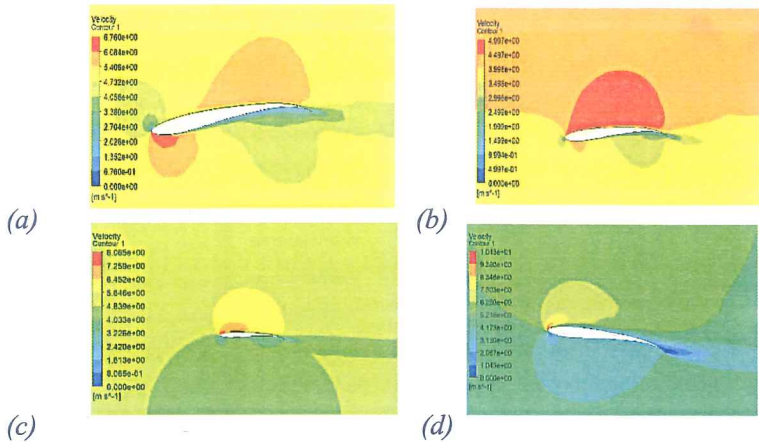
Hình 3.28. Biên dạng mẫu cánh S1223 và VAST-EPU-S1223

Một số kết quả phân tích khí động học mẫu cánh S1010 bằng mô hình mô phỏng số CFD như trong Hình 3.34.



Hình 3.34. Các giá trị C_l (a), C_d (b), C_l/C_d (c), C_l so với C_d (d) khi tốc độ gió 5,0 m/s.

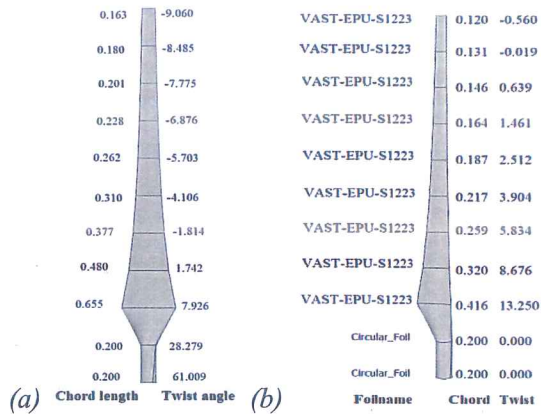
Kết quả thu được từ các mô hình phân tích CFD cũng có thể được trình bày dưới dạng hình ảnh trực quan thể hiện dòng chảy đi qua bề mặt mẫu cánh VAST-EPU-S1010, cùng với vị trí tách dòng và độ lớn của các xoáy theo góc AoA. Đây là một ưu điểm lớn của phương pháp CFD trong các bài toán phân tích khí động học. Các kết quả này được thể hiện trong Hình 3.37.



Hình 3.37. Đường đồng mức và xoáy khi tương tác với VAST-EPU-S1010: AoA=-5° (a), AoA=0° (b), AoA=5° (c), AoA=10°(d) khi tốc độ gió 5,0 m/s

Theo mô hình thiết kế như thể hiện trong Hình 3.15, 7 bước đầu tiên giúp thiết kế các mô hình mẫu cánh cho C_l/C_d lớn nhất. Từ bước 8 đến bước 11, các mô hình mẫu cánh này sẽ được sắp xếp theo các kích thước và góc xoắn khác nhau tùy thuộc vào bán kính rotor. Mục tiêu cuối cùng là tìm ra các biên dạng cánh cho hệ số công suất lớn nhất trong điều kiện vận hành cụ thể của tuabin. Mô hình VAST-EPU-S1223 tiếp tục được sử dụng để thiết kế toàn bộ cánh tuabin dựa

trên lý thuyết BOM. Kết quả được thể hiện trong Hình 3.41. Công suất điện lối ra tối đa của tuabin sử dụng cánh VAST-EPU-S1223 dài 5m là 3,05 kW, với hệ số công suất tối đa lên tới 50,5%. Giá trị hệ số công suất này lớn hơn khoảng 1,59 lần so với mô hình mẫu cánh ban đầu và lớn hơn 1,11 lần so với mô hình SG6043 trong cùng điều kiện vận hành với tốc độ gió 5,0 m/s. Trên thực tế, các tuabin thương mại tốt nhất hiện nay chỉ có thể đạt được giá trị hệ số công suất khoảng 45% đến 48%.



Hình 3.41. Thông số thiết kế cánh tuabin dài 5,0 m sử dụng SG6043 (a) và VAST-EPU-S1223 (b)

Kết luận: Để thiết kế hoặc lựa chọn tuabin phù hợp với khu vực phát triển dự án điện gió trên đất liền, cần thực hiện hai nội dung chính bao gồm: Xác định đặc điểm địa hình và tài nguyên gió tại khu vực theo vị trí và độ cao khác nhau; tính toán thiết kế hoặc lựa chọn thiết kế tuabin phù hợp với đặc điểm địa hình và tài nguyên gió để đạt được hệ số công suất lớn nhất.

Đối với những khu vực có tốc độ gió trung bình cao, cánh tuabin thường được thiết kế dài hơn, các mô hình mẫu cánh được sử dụng thường có MT lớn và MC nhỏ. Đối với tốc độ gió thực tế tại Việt Nam, chủ yếu từ 4,0 m/s đến 6,0 m/s, chiều dài cánh tuabin nên được thiết kế trong khoảng từ 4,0 m đến 8,0 m để hiệu quả khai thác năng lượng gió lớn nhất. Các mô hình mẫu cánh được sử dụng nên có MT nhỏ ($MT < 10\%$) và MC lớn ($MC > 10\%$). Điều này đảm bảo hiệu suất khai thác năng lượng gió của tuabin là cao nhất.

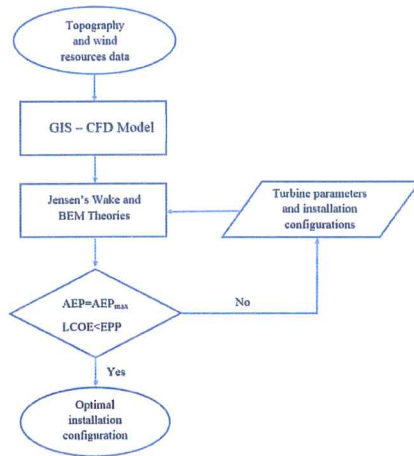
Mô hình thiết kế được đề xuất trong luận án này kết hợp những ưu điểm mạnh mẽ của cả mô hình lý thuyết và mô phỏng số. Kết quả thu được có độ tin cậy và trực quan cao.

Mô hình thiết kế cấu hình lắp đặt các tuabin trong trang trại điện gió:

Khi một khu vực trên đất liền được xác định là có tiềm năng và được quy hoạch phát triển dự án điện gió, việc khai thác hiệu quả nhất nguồn năng lượng gió tại khu vực này là cần thiết. Hiệu quả khai thác năng lượng gió phụ thuộc chủ yếu vào các yếu tố như đặc điểm tài nguyên gió, thiết kế tuabin và cấu hình bố trí tuabin trong trang trại gió. Đặc điểm tài nguyên gió sẽ thay đổi liên tục tùy thuộc vào địa hình và bố trí tuabin như đã phân tích ở các phần trước. Khi gió va chạm với các chướng ngại vật, nó sẽ tạo ra các dòng xoáy, gây nhiễu loạn và tổn thất năng lượng của dòng chảy, cuối cùng sẽ làm giảm công suất điện đầu ra của tuabin.

Luận án này trình bày một mô hình thiết kế tối ưu cho cấu hình lắp đặt tuabin trong một trang trại gió trên đất liền dựa trên sự kết hợp của các mô hình mô phỏng số GIS, CFD và lý thuyết BEM, Jensen. Mục tiêu của mô hình tối ưu này là xác định cấu hình lắp đặt

của một số tuabin nhất định trong một khu vực trang trại để đạt được giá trị AEP lớn nhất và giá trị LCOE hợp lý. Giá trị LCOE hợp lý có nghĩa là phải thấp hơn giá mua điện gió (EPP) hiện đang được áp dụng tại Việt Nam. Lưu đồ của mô hình thiết kế cấu hình lắp đặt tuabin này được thể hiện trong Hình 4.1.



Hình 4.1. Lưu đồ của mô hình thiết kế cấu hình lắp đặt tuabin

Mô hình thiết kế được đề xuất bao gồm năm quy trình chính:

- Quy trình 1: Thu thập các đặc điểm địa hình và tài nguyên gió tại khu vực phát triển trang trại gió.

- Quy trình 2: Mô phỏng quá trình tương tác giữa tài nguyên gió với địa hình khu vực trang trại trong các điều kiện khác nhau. Thông qua mô hình phân tích kết hợp GIS - CFD, tổn thất năng lượng gió do các yếu tố địa hình sẽ được xác định. Kết quả là các hàm phân

bố tốc độ gió tại các vị trí và độ cao khác nhau. Từ đó, các loại tuabin và cấu hình lắp đặt dự kiến trong khu vực trang trại sẽ được xác định.

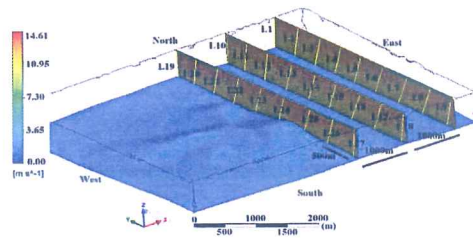
- Quy trình 3: Tổn thất năng lượng gió do các tuabin với cấu hình lắp đặt khác nhau sẽ được xác định bằng lý thuyết dòng xoáy Jensen. Các cấu hình khác nhau sẽ dựa trên các khoảng cách khác nhau giữa các hàng tuabin. Khoảng cách sẽ có giá trị tăng dần từ nhỏ đến lớn. Sau đó, công suất vận hành thực tế của các tuabin sẽ được xác định bằng lý thuyết BEM.

- Quy trình thứ 4: Giá trị AEP và LCOE của các cấu hình lắp đặt tuabin khác nhau sẽ được xác định lần lượt theo các hàm lý thuyết dựa trên dữ liệu tài nguyên gió sau khi hiệu chỉnh các tổn thất năng lượng do địa hình và các yếu tố tuabin gây ra. Tại mỗi cấu hình lắp đặt, các giá trị AEP và LCOE tương ứng sẽ được xác định. Nếu AEP của cấu hình lớn hơn cấu hình trước đó, cấu hình lắp đặt tuabin sẽ tiếp tục được thay đổi. Nếu cấu hình có AEP nhỏ hơn cấu hình trước đó hoặc khoảng cách giữa các hàng tuabin vượt quá chiều rộng của khu vực trang trại gió, quá trình thay đổi cấu hình sẽ dừng lại. Lúc này, kiểm tra cấu hình nào cho giá trị AEP lớn nhất và xét đến điều kiện LCOE nhỏ hơn EPP. Trong trường hợp cấu hình đáp ứng AEP lớn nhất nhưng LCOE lớn hơn EPP, cấu hình có AEP lớn nhất vẫn sẽ được ưu tiên. Vì hàm mục tiêu hướng đến hiệu quả khai thác năng lượng gió tối đa.

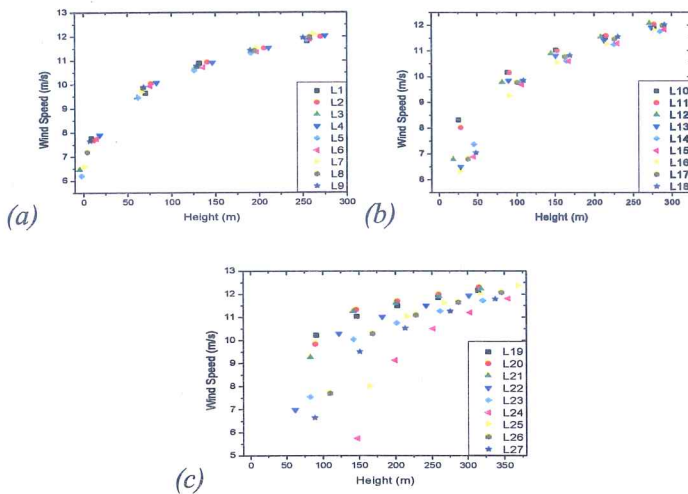
- Quy trình 5: Xác định cấu hình lắp đặt tối ưu, tức là cấu hình thỏa mãn đồng thời cả hai ràng buộc AEP lớn nhất và $LCOE < EPP$. Nếu kết quả phân tích cho thấy LCOE lớn hơn EPP, kết quả này có

thể được sử dụng làm cơ sở khoa học để thuyết phục các cơ quan quản lý nhà nước như EVN điều chỉnh mức EPP cho phù hợp hơn.

Mô hình thiết kế này được áp dụng cho khu vực tỉnh Khánh Hòa (Ninh Thuận), xung quanh tọa độ ($11^{\circ}27'51.1''\text{B}$; $109^{\circ}00'17.6''\text{Đ}$). Kết quả thu được phân bố tốc độ gió theo độ cao tại các vị trí khác nhau trong trang trại như trong Hình 4.8 và Hình 4.9.



Hình 4.8. Các vị trí được khảo sát chi tiết trong mô hình



Hình 4.9. Phân bố tốc độ gió theo độ cao tại các vị trí khác nhau

Thông qua các bước như trong Hình 4.1, cấu hình lắp đặt các tuabin E103 phù hợp nhất đối với khu vực trang trại này được thể hiện như trong Hình 4.10. Theo cấu hình này, tuabin sẽ được lắp theo 3 hàng vuông góc với hướng đông. Khoảng cách giữa hai tuabin gần nhau nhất trong cùng một hàng là 3Drotor và khoảng cách giữa hai hàng tuabin gần nhau nhất là 10Drotor.



Hình 4.10. Cấu hình tối ưu để lắp đặt tuabin E103 tại trang trại

Cấu hình lắp đặt tuabin mới được đề xuất cho giá trị sản lượng điện lên đến 203.84GW, cao hơn khoảng 2.5 lần so với cấu hình hiện tại. giá trị LCOE của cấu hình này khoảng 79.7\$/MWh, tương đương với giá mua điện tại Việt Nam năm 2025.

Kết luận: Mô hình thiết kế cấu hình lắp đặt trang trại gió được đề xuất trong luận án này có thể xác định ảnh hưởng của các yếu tố địa hình, tài nguyên gió, loại tuabin và cấu hình lắp đặt tuabin trong khu vực phát triển trang trại gió đến giá trị AEP. Mục tiêu của mô hình thiết kế này là xác định cấu hình lắp đặt tuabin trong trang trại để đạt được giá trị AEP lớn nhất. Mô hình này sử dụng nguồn dữ liệu địa hình dựa trên GIS. Do đó, dữ liệu bề mặt địa hình của trang trại như độ nhám và độ cao được thể hiện trực quan và rõ ràng. Khi đó, chỉ cần dữ liệu tài nguyên gió tại một điểm trong khu vực trang trại. Phương

pháp CFD sẽ mô phỏng toàn bộ quá trình tương tác của tài nguyên gió này với địa hình cụ thể. Từ đó, các đặc điểm tài nguyên gió tại từng vị trí trong khu vực trang trại gió được xác định. Đây là một ưu điểm lớn của CFD so với tất cả các phương pháp khác. Rõ ràng, mô hình kết hợp GIS - CFD có nhiều tính năng vượt trội trong việc giải quyết các bài toán khí động học của trang trại gió.

Lý thuyết Jensen và BEM thực hiện các tính toán để xác định AEP dựa trên kết quả thu được từ mô hình GIS - CFD. Việc kết hợp đồng thời lý thuyết và mô hình mô phỏng làm cho mô hình thiết kế này trở nên hoàn hảo, đồng thời đánh giá được nhiều yếu tố khác nhau ảnh hưởng đến AEP của một trang trại gió trên đất liền tại Việt Nam.

KẾT LUẬN

Luận án đã tiến hành nghiên cứu và đề xuất các mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin và cấu hình lắp đặt các tuabin cho các trang trại điện gió trên đất liền. Các mô hình này bao gồm ba phần chính: xác định vị trí có tiềm năng năng lượng gió lớn, biên dạng cánh tuabin cho hệ số công suất lớn nhất và cấu hình lắp đặt các tuabin cho sản lượng điện hàng năm lớn nhất.

Các mô hình thiết kế này bao gồm cả lý thuyết phân tích và phương pháp mô phỏng số. Các lý thuyết này giúp xác định mối quan hệ giữa các đại lượng mô tả hoạt động của tuabin gió. Các mô hình mô phỏng giúp hiệu chỉnh các giá trị tốc độ gió, cường độ chảy rối, tần suất tốc độ gió và hướng gió tại các vị trí trong khu vực phát triển trang trại điện gió trên đất liền. Các mô hình này rất phù hợp và có thể áp dụng rộng rãi với các điều kiện thực tế tại Việt Nam.

Ngoài ra, điều kiện biên của các mô hình là điều kiện địa hình, biên dạng cánh và điều kiện ban đầu là đặc trưng tài nguyên gió. Do đó, các mô hình thiết kế này chỉ cần dữ liệu tài nguyên gió được đo tại một vị trí trong khu vực trang trại. Sau đó, toàn bộ quá trình di chuyển, tương tác và biến đổi của các đặc trưng tài nguyên gió theo địa hình và biên dạng cánh sẽ được mô hình GIS - CFD mô tả chính xác. Từ đó, một số trường hợp phân tích rủi ro giả định trong điều kiện thời tiết khắc nghiệt cũng có thể được xác định dễ dàng, giúp giảm thiểu các vấn đề liên quan đến sự cố và tai nạn trong suốt vòng đời hoạt động của tuabin. Đây cũng là một ưu điểm lớn của mô hình này so với các mô hình thiết kế khác.

Các mô hình thiết kế được đề xuất trong luận án này có hiệu quả cao và trực quan. Tuy nhiên, các mô hình tham gia như GIS và CFD là các mô hình dữ liệu lớn hiện đại. Để sử dụng các mô hình này, cần có hệ thống máy tính có cấu hình đủ lớn và người thực hiện các phân tích này phải có đủ kiến thức và kinh nghiệm. Đặc biệt là kinh nghiệm trong việc lựa chọn loại lưới, chia lưới, lựa chọn bộ giải, mô hình chảy rối trong các mô hình mô phỏng CFD.

Một số đóng góp mới về khoa học và thực tiễn:

- Về mặt khoa học: Luận án nghiên cứu xây dựng và đề xuất các mô hình thiết kế dựa trên sự kết hợp giữa lý thuyết BEM, Jensen và các mô hình mô phỏng số hiện đại như GIS, CFD. Các mô hình GIS sử dụng nguồn dữ liệu không gian lớn, độ phân giải cao để xác định chính xác các đặc điểm địa hình của khu vực trang trại gió. Các mô hình CFD là các công cụ phân tích và mô phỏng số hiện đại. Các hệ phương trình bảo toàn được sử dụng để mô tả chính xác và trực quan tất cả các tương tác có thể có của các nguồn tài nguyên gió trong khu vực trang trại. Việc xác định phương pháp chia lưới, lựa chọn mô hình dòng chảy rối, điều kiện biên và điều kiện ban đầu đóng vai trò quyết định đến độ chính xác của các mô hình mô phỏng CFD. Các tham số cụ thể của các mô hình mô phỏng CFD được sử dụng trong luận án này cũng có đóng góp về mặt khoa học.

- Về mặt thực tiễn: Việt Nam đang phát triển mạnh mẽ năng lượng tái tạo. Trong đó, điện gió sẽ đóng góp tỷ trọng lớn vào cơ cấu nguồn điện trong tương lai. Hiện nay, Việt Nam đang trong quá trình triển khai nhiều dự án điện gió trên bờ và ngoài khơi. Luận án này cung cấp các mô hình thiết kế biên dạng cánh và cấu hình lắp đặt các tuabin cho các trang trại điện gió trên đất liền. Các mô hình này có thể

góp phần nâng cao hiệu quả quản lý và đầu tư các dự án điện gió trên đất liền tại Việt Nam. Luận án đã đóng góp 02 mô hình thiết kế mới, cụ thể bao gồm:

- Mô hình thiết kế biên dạng cánh tuabin theo điều kiện tài nguyên gió thực tế tại Việt Nam, nhằm đạt được hệ số công suất lớn nhất.

- Mô hình thiết kế cấu hình lắp đặt các tuabin trong các trang trại điện gió trên đất liền theo điều kiện địa hình và tài nguyên gió thực tế tại Việt Nam, nhằm đạt được giá trị sản lượng điện hàng năm lớn nhất.

Các hướng nghiên cứu tiếp theo:

Những kết quả trình bày trong luận án này chỉ là bước đầu. Trong thời gian tới, các hướng nghiên cứu liên quan đến việc lựa chọn vật liệu chế tạo cánh tuabin và công nghệ chế tạo cánh tuabin dựa trên công nghệ hiện đại như in 3D sẽ được ưu tiên. Bên cạnh đó, các nghiên cứu sử dụng mô hình trí tuệ nhân tạo cũng sẽ được tiến hành để so sánh và kiểm chứng với kết quả thu được từ các mô hình thiết kế được đề xuất trong luận án này.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC

1. **Dinh Van Thin**, Le Quang Sang, Chau Dinh Van, Nguyen Huu Duc, *Technology trends in onshore wind turbine design – Performance assessment in Vietnam*, 2nd Asia Meeting on Environment and Electrical Engineering (EEE-AM), Hanoi, Vietnam, 2025, pp. 1-5, IEEE Xplore.

2. **Dinh Van Thin**, Le Quang Sang, Chau Dinh Van, Nguyen Huu Duc, *Study on design of NREL 5MW equivalent turbine blade using VAST-EPU-N6409 airfoil model*, 2nd Asia Meeting on Environment and Electrical Engineering (EEE-AM), Hanoi, Vietnam, 2025, pp. 1-4, IEEE Xplore.

3. **Dinh Van Thin**, Le Quang Sang, Chau Dinh Van, Tran The Vinh, Duc Nguyen Huu, *A proposed airfoil configuration to improve aerodynamic efficiency applied in the design of small wind turbines*, Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, Vol. 133, No. 2, 2025, pp. 140 – 154. <https://doi.org/10.37934/arfmts.133.2.140154>. ISSN: 2289 – 7879.

4. **Dinh Van Thin**, Le Quang Sang, Nguyen Huu Duc, *Optimization method of wind turbine locations in complex terrain areas using a combination of simulation and analytical models*, IEEE Access, Vol. 13, 2025, pp. 114384 – 114400. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3584560>. ISSN: 2169 - 3536.

5. Le Quang Sang, Tinnapob Phengpom, **Dinh Van Thin**, Nguyen Huu Duc, Le Thi Thuy Hang, Cu Thi Thanh Huyen, Nguyen Thi Thu Huong, Quynh T. Tran, *A method to design an efficient airfoil for small wind turbines in low wind speed conditions using XFRLR5 and CFD simulations*, Energies, Vol. 17, No. 16, 2024, pp. 1 – 19. <https://doi.org/10.3390/en17164113>. eISSN: 1996 - 1073.

6. **Dinh Van Thin**, Nguyen Huu Duc, Le Quang Sang, Nguyen Tuan Anh, Nguyen Trung Hieu, *Analysis and comparison of aerodynamics of NACA airfoils under low wind speed conditions*, Hanoi University of Industry Journal of Science and Technology, Vol.

60, No. 7, 2024, pp. 150 – 156. P-ISSN: 1859-3585; E-ISSN: 2615-9619.

7. **Dinh Van Thin**, Nguyen Huu Duc, Le Quang Sang, *Consideration of various configurations of SG6043-based rotor applied in small capacity horizontal axis wind turbine*, Int. J. Renew. Energy Dev., Vol. 13, No. 3, 2024, pp. 396 – 404. <https://doi.org/10.61435/ijred.2024.60036>. ISSN: 2252 - 4940.

8. **Dinh Van Thin**, Nguyen Huu Duc, Le Quang Sang, *Aerodynamic analysis of NACA64A010 airfoil using XFLR5 and ANSYS Fluent*, GMSARN International Journal, Vol. 18, No. 2, 2024, pp. 258 – 266. ISSN: 1905 – 9094.

9. **Dinh Van Thin**, Le Quang Sang, Chau Dinh Van, Nguyen Huu Duc, *Modifying NACA6409 airfoil configuration to improve aerodynamic performance in low wind speeds*, 1st Asia Meeting on Environment and Electrical Engineering (EEE-AM), Hanoi, Vietnam, 2023, pp. 1-5, IEEE Xplore. <https://doi.org/10.1109/EEE-AM58328.2023.10395332>.

10. **Dinh Van Thin**, Nguyen Huu Duc, Le Quang Sang, Doan Van Binh, *Study to evaluate the effect of terrain surface on performance of a wind farm in Ninh Thuan province*, Vietnam, E3S Web of Conferences Vol. 470, 2023, ID. 01038, pp. 1 – 11. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202347001038>. eISSN: 2267-1242.

11. **Dinh Van Thin**, Nguyen Huu Duc, Le Quang Sang, *Evaluating the wind resources in an area that is equivalent to the size of a wind power plant: a methodology*, TNU Journal of Science and Technology, Vol. 228, No. 2, 2023, pp. 343 – 351. ISSN: 1859 - 2171, 2374 - 9098; e-ISSN: 2615 – 9562.

12. **Dinh Van Thin**, Nguyen Huu Duc, Le Quang Sang, *Analysis of aerodynamic parameters of the S1210 wind turbine airfoil under the condition of low Reynolds number*, UD-JST, Vol. 20, No. 10.1, 2022, pp. 77 – 81. ISSN: 1859 -1531.

13. **Dinh Van Thin**, Nguyen Huu Duc, Le Quang Sang, *Aerodynamic analysis of NACA6409 airfoil in wind turbine by using Panel method*, TNU Journal of Science and Technology, Vol. 227, No. 8, 2022, pp. 227 – 235; ISSN: 1859-2171, 2374-9098; e-ISSN 2615-9562.

